

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Ордена Ленина Сибирское отделение  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, В.А. Горбунов,  
И.В. Горнаков, Г.И. Кузнецов, А.Н. Лукин,  
И.Г. Макаров, Н.В. Матяш, Г.Н. Острейко,  
А.Д. Панфилов, Н.Д. Ромашко, Г.В. Сердобинцев,  
В.В. Тарнецкий, М.А. Тиунов, А.А. Тувик,  
Б.Л. Факторович, К.Н. Чернов, В.Г. Ческидов

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ  
ПРОТОТИПА МОЩНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО  
УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ  
НА ЭНЕРГИЮ 5 МэВ

ИЯФ 2008-20

НОВОСИБИРСК  
2008

**Стендовые испытания прототипа  
мощного промышленного ускорителя электронов  
на энергию 5 МэВ**

*В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, В.А. Горбунов, И.В. Горнаков,  
Г.И. Кузнецов, А.Н. Лукин, И.Г. Макаров, Н.В. Матяш,  
Г.Н. Острейко, А.Д. Панфилов, Н.Д. Ромашко, Г.В. Сердобинцев,  
В.В. Тарнецкий, М.А. Тиунов, А.А. Тувик, Б.Л. Факторович,  
К.Н. Чернов, В.Г. Ческидов*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

**Аннотация**

Описан прототип линейного ускорителя, разработанный и изготовленный для проверки возможности создания мощного промышленного ускорителя 300 кВт, 5 МэВ с импульсной мощностью в пучке 2 МВт и электронным КПД более 70% (требуемая мощность ВЧ генератора 2.8 МВт). Рабочая частота ускорителя 176 МГц. Приведены данные численного моделирования и измерений параметров основных узлов ускорителя. Испытания прототипа проводились на стенде: мощность генератора 2.5 МВт, длительность импульсов 420 мкс, частота повторения до 50 имп./сек. Получен импульсный ток пучка 350 мА при энергии электронов 5 МэВ, что близко к расчетным значениям при достигнутой мощности ВЧ генератора.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

---

## 1. Введение

В ИЯФ СО РАН, начиная с 2002 года, велась разработка промышленного линейного ВЧ ускорителя с энергией электронов 5 МэВ и средней мощностью пучка до 300 кВт [1]. Необходимо было создать дешевый и надежный промышленный ускоритель простой конструкции с минимальными эксплуатационными расходами.

Первый этап работ предусматривал проектирование, изготовление и испытание прототипа ускорителя с энергией 5 МэВ с использованием существующего анодного модулятора и ВЧ генератора с выходным каскадом на триоде ГИ-50А. На этом прототипе необходимо было получить расчетные импульсные параметры.

В 2007 году произведен успешный запуск прототипа ускорителя. Режим работы импульсный. Длительность импульсов 420 мкс при частоте повторения 40 имп./сек. Рабочая частота ускорителя 176.3 МГц. Получены параметры, близкие к расчетным: энергия электронов 5 МэВ, импульсная мощность пучка 1.7 МВт, электронный КПД ускоряющей структуры 68%.

Второй этап работ потребует разработки более мощного ВЧ генератора и анодного модулятора, необходимых для получения средней мощности ускоренного пучка 300 кВт при соответствующей длительности и частоте повторения импульсов.

В работе кратко описывается принятая концепция мощного промышленного ускорителя. Приводятся функциональная схема прототипа, конструктивные решения основных составляющих ее узлов и результаты измерений их параметров. Описываются и обсуждаются результаты первых стендовых испытаний прототипа ускорителя, проводится их сравнение с результатами моделирования.

## 2. Концепция ускорителя

На рисунке 1 представлена принятая нами блок-схема мощного промышленного ускорителя.

Основными элементами ускорителя являются: ускоряющая структура, ламповый двухкаскадный усилитель, модулятор, триодная электронная пушка и конвертер.

Первой особенностью ускорителя является то, что в нем для ускорения электронов используется низкочастотная многорезонаторная структура на

стоячей волне с резонаторами связи на оси. Для возбуждения ускоряющей структуры на относительно низкой частоте возможно создание генератора на основе мощных высокоэффективных (с КПД до 80%) электровакуумных приборов, например, на диакроде TH628 фирмы THALES [2].

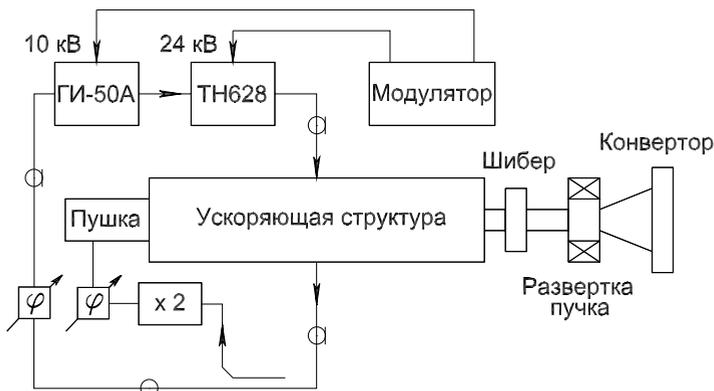


Рис. 1. Блок-схема ускорителя.

Второй особенностью ускорителя на низкой частоте является возможность использования в качестве источника электронов триодной ВЧ пушки, помещенной непосредственно в первый ускоряющий зазор. Узкий энергетический спектр мощного электронного пучка, необходимый для эффективного преобразования его мощности в гамма-излучение, и проведение пучка через структуру почти без потерь, обеспечиваются путем подачи на зазор сетка-катод этой пушки дополнительного ВЧ напряжения.

Третьей особенностью является применение двухкаскадного генератора с цепью обратной связи, замкнутой через ускоряющую структуру. При этом отпадает необходимость в системе стабилизации частоты ускоряющей структуры или генератора. В результате, существенно упрощаются как генератор, так и система управления ускорителем.

Принятая концепция позволяет существенно упростить конструкцию и уменьшить стоимость всего ускорителя, а также повысить его надежность и уменьшить эксплуатационные расходы.

### 3. Разработка, изготовление и измерение параметров узлов прототипа ускорителя

Функциональная схема прототипа ускорителя представлена на рис. 2. ВЧ система включает в себя ускоряющую структуру, ВЧ пушку, ввод мощности, высокочастотный коаксиальный тракт и двухкаскадный ВЧ генератор.

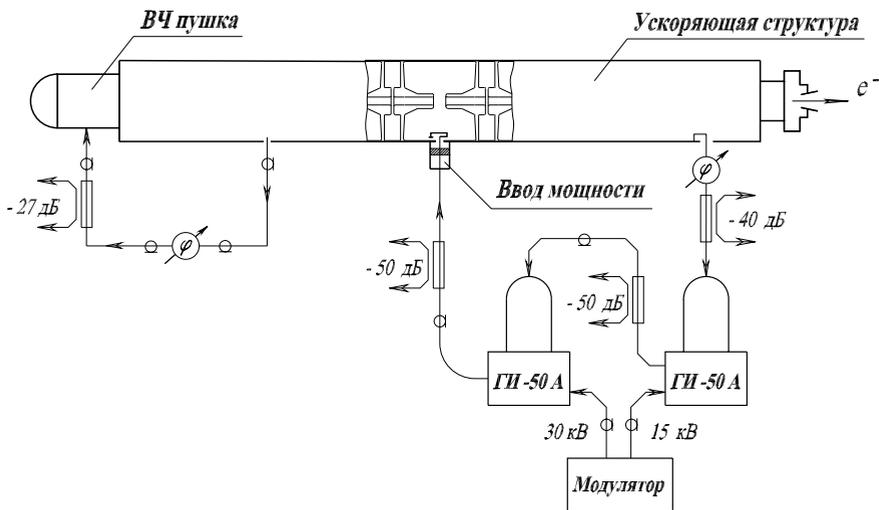


Рис. 2. ВЧ система прототипа ускорителя.

Ускоряющая структура (рис. 3) работает в режиме стоячей волны и представляет собой цепочку связанных резонаторов. Источником электронов является триодная пушка (рис. 4), расположенная непосредственно на передней стенке первого ускоряющего резонатора структуры. Ввод мощности в ускоряющую структуру производится через петлю связи, индук-



Рис. 3. Ускоряющая структура.

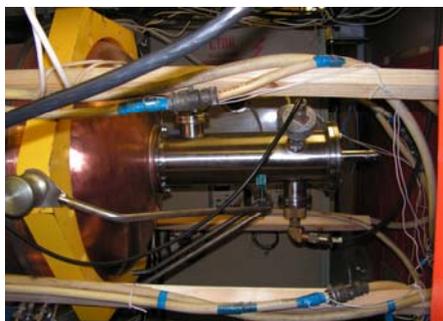


Рис. 4. ВЧ пушка на ускоряющей структуре.

тивность которой компенсирована конструктивной емкостью на ее конце. Мощность от выходного каскада генератора поступает по коаксиальному фидеру длиной  $2\lambda$  (рис. 5). Двухкаскадный усилитель выполнен на триодах ГИ-50А (рис. 6). Выходной каскад выдает мощность  $\sim 2.5$  МВт в импульсе 420 мксек. Уровень мощности контролируется направленным ответвителем. Для организации положительной обратной связи автогенератора часть

мощности ( $\sim 30$  кВт) отводится из ускоряющей структуры петлёй обратной связи. Далее мощность проходит через коаксиальную раздвижную фазосдвигающую линию и поступает на вход двухкаскадного усилителя. Высоковольтный модулятор обеспечивает подачу импульсного напряжения 15 кВ на предварительный каскад генератора и 30 кВ на окончательный. Частота повторения импульсов до 50 имп/сек.



Рис. 5. Коаксиальный фидер (вверху) с направленным ответвителем (по центру) и вводом мощности (внизу).



Рис. 6. Двухкаскадный генератор на триодах ГИ-50А.

Далее более подробно приведены описания основных узлов прототипа ускорителя и результаты измерения их параметров.

### 3.1. Ускоряющая структура

Геометрия ускоряющей структуры прототипа представлена на рис. 7. Она состоит из трёх полных и двух концевых (половинных) ускоряющих резонаторов и четырёх резонаторов связи [3,4]. Структура является бипериодической с резонаторами связи на оси и работает на частоте 176.3 МГц в

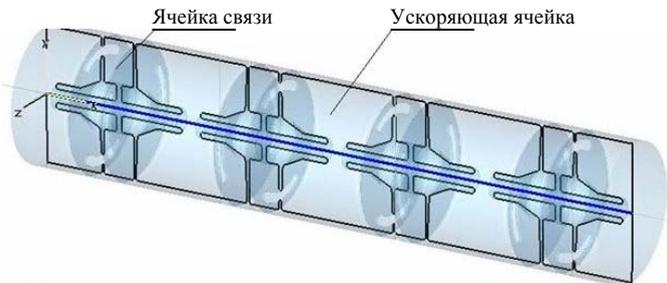


Рис. 7. Геометрия ускоряющей структуры.

режиме стоячей волны на моде  $\pi/2$ . Связь между резонаторами осуществляется по магнитному полю через щели связи. Щели в противоположных стенках каждого резонатора связи повернуты друг относительно друга на  $90^\circ$  для уменьшения коэффициента связи через ячейку. Рабочий тип колебания  $E_{010}$ .

Геометрия ускоряющих резонаторов была оптимизирована численно с помощью программы SuperLANS [5] по добротности и напряженности ВЧ полей на поверхности электродов.



Рис. 8. Элементы ускоряющей структуры перед сборкой.

Полный ускоряющий резонатор состоит из трех частей (см. рис. 8): наружной обечайки внутренним диаметром 700 мм (справа), и двух торцевых стенок с цилиндрическими электродами (слева), обращенными друг к другу и образующими зазор 110 мм. Торцевые стенки имеют по две азимутальные щели связи. На наружных обечайках ускоряющих резонаторов располагаются фланцы для подключения магниторазрядных насосов, ввода мощности, петли обратной связи, петли отбора мощности и измерительных петель. Резонаторы связи имеют тот же диаметр обечайки (рис. 8, по центру, на заднем плане).

На рис. 9 показана начальная стадия изготовления элементов ускоряющей структуры.



Рис. 9. Заготовки элементов ускоряющей структуры: а) обечайек; б) торцевых стенок; в) соединительных фланцев обечайек.

На рис. 10 показана схема охлаждения ускоряющих резонаторов структуры, рассчитанная на режим работы ускорителя 5 МэВ со средней мощностью в пучке 300 кВт. Из расчетов следует, что большая часть (5 кВт) средней тепловой мощности ВЧ потерь выделяется на наружной поверхности электрода ускоряющего резонатора. Электрод имеет свою водяную ветвь охлаждения в виде медной трубки внутренним диаметром 8 мм, уложенной внутри электрода вблизи наружной поверхности. Торцевая стенка резонатора имеет свою ветвь охлаждения, выполненную такой же трубкой. Количество выделяемой средней тепловой мощности на поверхности стенки – 4 кВт. На внутренней поверхности обечайки выделяется 2.3 кВт и она охлаждается двумя параллельными ветвями, выполненными в виде напаянных на наружную поверхность медных шинок прямоугольного сечения с внутренним отверстием  $\varnothing$  8.5 мм.

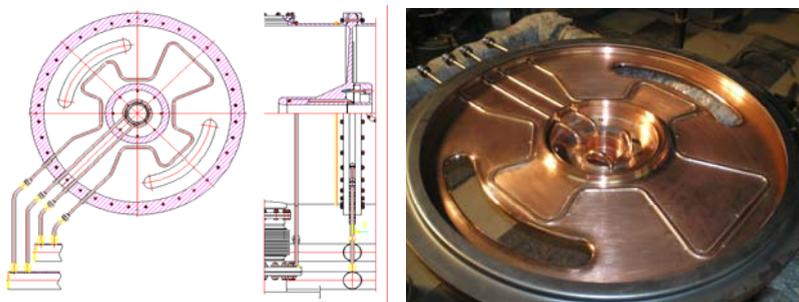


Рис. 10. Система охлаждения коаксиальной части и диска.

Ускоряющая структура изготовлена из меди вакуумной плавки. Элементы резонаторов и трубки охлаждения спаяны медно-серебрянным припоем ПСр72 в вакуумной печи. Резонаторы соединяются между собой через индиевые уплотнения и образуют единый вакуумный объем.

Для измерения и подгонки парциальных частот ячеек ускоряющая структура была собрана без индиевых уплотнений в вертикальном положении. Измерение парциальной частоты отдельной ячейки ускоряющей структуры можно провести, если отстроить собственные частоты соседних с ней ячеек. Отстройка производилась путем закорачивания зазоров соседних ячеек при помощи медных стержней, вводимых по оси структуры. Качество отстройки собственных частот данным методом было проверено с помощью численного моделирования.

Измерения показали, что разброс частот ускоряющих ячеек не превышал  $\pm 10^{-3}$  и обеспечивался высокой точностью их изготовления. Частоты ячеек связи были ниже рабочей частоты на  $\sim 9$  МГц. Подгонка их частоты была выполнена проточкой центральных съемных цилиндров ячеек связи.

После очистки поверхностей (рис. 11) структура собиралась с индиевыми уплотнениями и проводились окончательные измерения парциальных

частот резонаторов. Их значения указаны на общем виде ускоряющей структуры (рис. 12).



Рис. 11. Процесс очистки поверхностей элементов ускоряющей структуры.

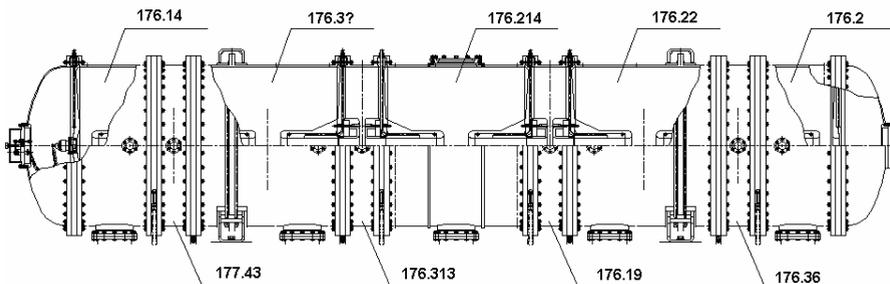


Рис. 12. Общий вид ускоряющей структуры с результатами измерений парциальных частот резонаторов после окончательной сборки

Для определения полосы непрозрачности ускоряющей структуры были измерены частоты видов колебаний  $\pi/2$  двух связанных цепочек резонаторов, отличающихся конечными элементами. Измерения показали, что полоса непрозрачности ускоряющей структуры мала и составляет 0.034 МГц.

Экспериментально частоты связи ускоряющей структуры были измерены анализатором цепей (см. рис. 13). По результатам эксперимента была построена дисперсионная характеристика ускоряющей структуры. Она хорошо совпала с результатами 3D расчетов программой Microwave Studio [6]. Дисперсионная кривая достаточно симметрична относительно рабочего вида колебаний, следовательно, соседние частоты связи имеют максимальное удаление от частоты рабочего вида (рис. 14).

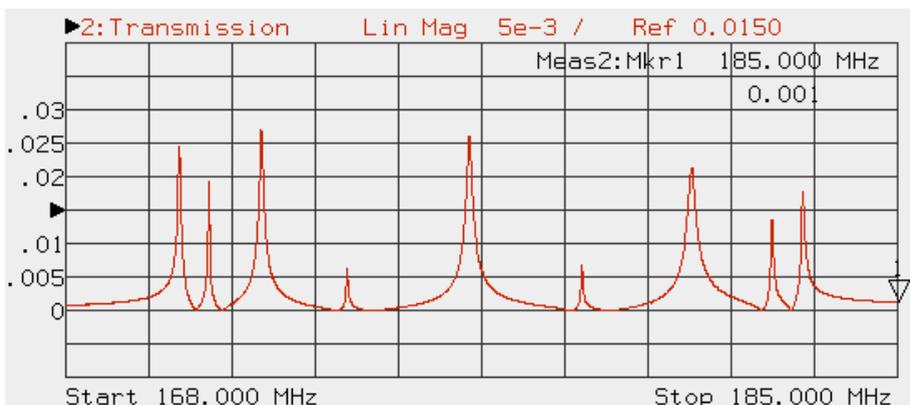


Рис. 13. Частоты связи ускоряющей структуры.

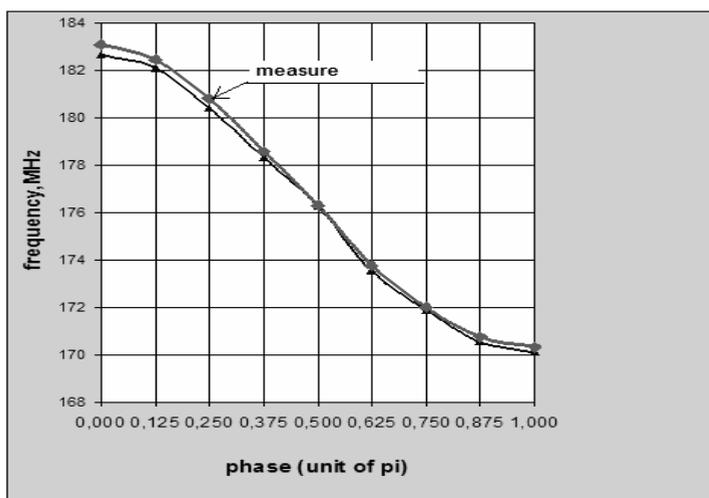


Рис. 14. Расчетная и измеренная дисперсионные кривые ускоряющей структуры.

Были проведены измерения относительных величин амплитуд полей рабочей моды в ускоряющих ячейках структуры методом малого возмущения при помощи диэлектрического шарика (таблица 1). Измерения с хорошей точностью совпали с результатами 3D расчетов.

Таблица 1

Номер ячейки (ускоряющего резонатора)	1	2	3	4	5
Частота при введении шарика, МГц	176.284	176.288	176.288	176.288	176.293
Отклонение от частоты рабочей моды, кГц	-23	-19	-19	-19	-14
Нормированные значения полей	1.1	1	1	1	0.86

Различие напряженностей полей первого и пятого резонаторов связано с отличием геометрии их торцевых стенок.

Параметры ускоряющей структуры приведены в таблице 2.

Таблица 2

Рабочая частота, МГц	176.307
Добротность	21000
Характеристическое сопротивление, Ом	824
Шунтовое сопротивление, МОм	17.3
Коэффициент связи, %	7.8
Коэффициент пролета	0.986

### 3.2. Высокочастотная пушка

Схема ВЧ пушки прототипа представлена на рис.15. ВЧ пушка состоит из катода (1), сетки (2) и анода, роль которого выполняет противоположный электрод ускоряющей полаячейки структуры. Особенностью катодно-сеточного узла является щелевая сетка, ячейки которой являются щелями разной длины, но одинаковой ширины между эквидистантно натянутыми параллельными проволочками (см. рис. 16). Кроме того, что такая сетка обладает большей прозрачностью по сравнению с обычной используемой в ускорителях серии ИЛУ ячеистой сеткой, ее электронно-оптические свойства были с хорошей точностью численно промоделированы и оптимизированы в двумерном приближении с помощью программы SAM [7].

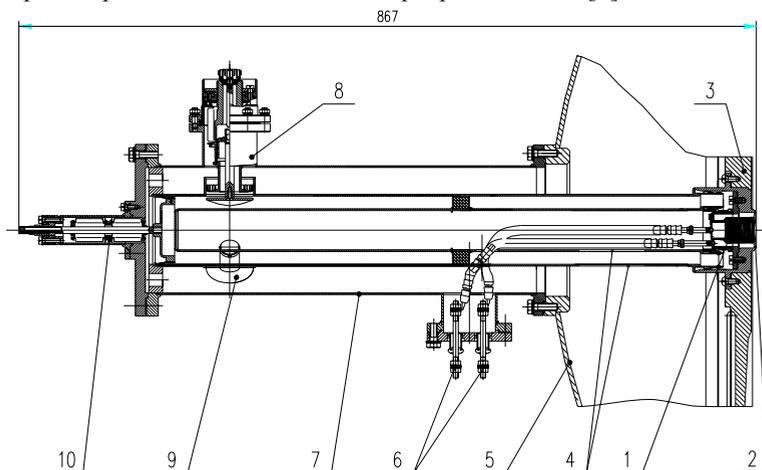


Рис. 15. Схема ВЧ пушки: 1 – катодный узел, 2 – сетка, 3 – передняя стенка ускоряющей структуры, 4 – коаксиальный полуволновый резонатор, 5 – крышка вакуумного бака, 6 – вводы накала, 7 – вакуумный стакан, 8 – узел ввода ВЧ мощности, 9 – контроль ВЧ, 10 – подстройка частоты.

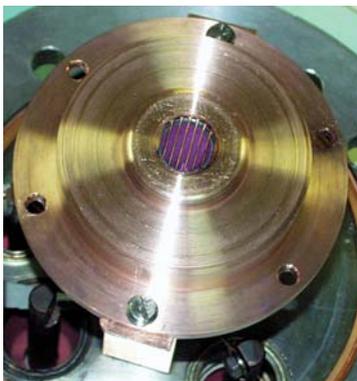


Рис. 16. Фотография катодно-сеточного узла.



Рис. 17. ВЧ пушка на измерительном стенде.

Катодно-сеточный узел триодной пушки размещен в центре передней стенки (3) первой полуячейки ускоряющей структуры. Катод (1) установлен на изоляторе и находится под постоянным запирающим потенциалом по отношению к заземленной сетке (2). Таблетка катода диаметром 20 мм выполнена из гексаборида лантана ( $\text{LaB}_6$ ). Расстояние между сеткой и катодом 1 мм в нагретом состоянии катода. Для сужения спектра ускоренных электронов и оптимизации их продольной динамики по токопрохождению на зазор сетка-катод подается дополнительное ВЧ напряжение рабочей частоты необходимой амплитуды и фазы. Это напряжение формируется в полуволновом коаксиальном резонаторе (4), нагруженном на одном конце емкостью сетка-катод, а на другом, переменной емкостью подстройки частоты (10). ВЧ мощность поступает из ускоряющей структуры по 50 Ом кабелю через фазосдвигающую линию и направленный ответвитель на узел ввода мощности (8), который обеспечивает регулировку связи с резонатором ВЧ пушки. В пучности тока коаксиального резонатора выведены проводники (6) питания подогревателя катода по которым также подается напряжение смещения.

Измеренная добротность резонатора 700, волновое сопротивление 18 Ом. При работе с пучком резонатор должен быть нагружен до значения добротности  $10 \div 20$ . Это необходимо для уменьшения не регулируемой по фазе добавки к амплитуде ВЧ напряжения на катоде за счет проницаемости сетки.

Общий вид ВЧ пушки на измерительном стенде приведен на рис. 17.

### 3.3. Ввод мощности

Для испытаний ускоряющей структуры разработан ввод на импульсную мощность 3 МВт при средней мощности до 50 кВт ( мощность выходного

каскада испытательного стенда не превышает 50 кВт). Конструкция ввода позволяет оперативно изменять связь с ускоряющей структурой.

Ввод мощности (см. рис. 18) представляет собой низкоомную коаксиальную линию (5) с размерами:  $D = 160$  мм,  $d = 100$  мм. Волновое сопротивление этой линии близко к оптимальной величине  $W = 30$  Ом, обеспечива-

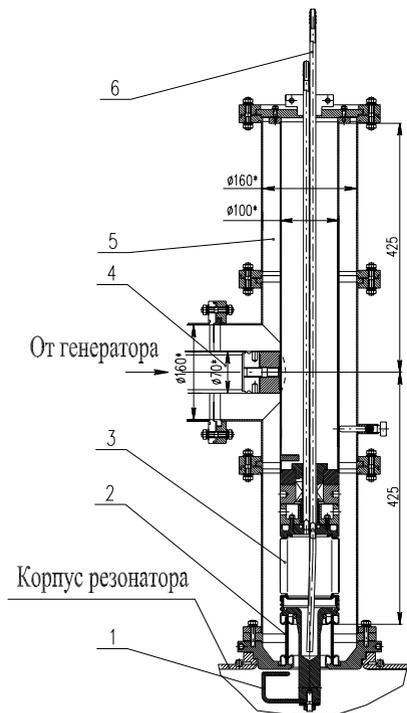


Рис. 18. Конструкция ввода мощности.

ющей минимальную напряженность электрического поля на поверхности центрального проводника. Один конец линии закорочен, а другой переходит в петлю связи (1), индуктивность которой компенсирована конструктивной емкостью. Вакуумная часть ввода мощности отделена от атмосферы цилиндрическим изолятором (2) с размерами  $D = 80$  мм,  $d = 70$  мм и  $h = 60$  мм. из керамики 22ХС ( $\epsilon = 9.3$ ,  $\tan\delta = 7 \cdot 10^{-4}$ ,  $\lambda = 13.4$  Вт/м·К). Механическая развязка керамики от жесткого коаксиала производится сильфоном (3). Предусмотрено также водяное охлаждение (6). Ввод устанавливается на центральном резонаторе ускоряющей структуры. Уплотнение на вакуум производится посредством индиевой проволоки диаметром 1 мм. Высокочастотная мощность подводится 50 Ом фидером (4) в месте, разделяющем коаксиальную часть ввода на четвертьволновый изолятор и четвертьволновый трансформатор. Общий вид ввода мощности показан на рис. 19.



Рис. 19. Общий вид ввода мощности.

В рабочем режиме бегущей волны при мощности  $P = 3$  МВт в импульсе напряжение в фидере равно 17.3 кВ. Напряжение на изоляторе после четвертьволнового трансформатора с волновым сопротивлением 28 Ом в согласованном режиме оказывается равным 9.8 кВ, что почти вдвое ниже напряжения в фидере.

Расчет напряженностей электрических полей во вводе мощности, а также удельной мощности тепловых потерь проводился пакетом программ SuperLANS. Расчеты показали, что максимальная напряженность электрического поля не превышает 10 кВ/см, тепловые потери в изоляторе при скважности 7 равны 10 Вт, а перепад температуры по изолятору 5 °С.

Испытания ввода ВЧ мощности проводились на стенде. Стенд состоит из вакуумного объема и высокочастотного генератора на частоту 180 МГц (см. рис. 20). Мощность генератора  $P = 2$  кВт, длительность импульса 100 мкс, частота повторения 1 кГц, скважность 10.



Рис. 20. Стенд для испытания ввода мощности.

Испытания проводились в два этапа. На первом этапе испытывалась электрическая прочность изолятора. Для этого петля ввода мощности снималась и организовывался четвертьволновый контур с кондуктивной связью. В данной схеме испытаний изолятор находится в максимуме напряжения стоячей волны. На втором этапе испытывался настроенный ввод мощности с петлей связи, представляющий из себя трехчетвертьволновый контур. Связь с контуром – емкостная, расположена в месте подключения фидера. В этой схеме испытаний изолятор находится в минимуме напряжения стоячей волны.

Тренировка позволила пройти мультипактор при рабочих уровнях мощности и улучшить вакуум во вводе мощности за счет снижения уровня возникновения мультипактора на фронтах импульса. Пробои по изолятору не наблюдались при напряжении на 30% выше номинального уровня в режиме бегущей волны в фидере. При кратковременном включении генератора на стенде в непрерывный режим тепловые нагрузки на изолятор не вызывали его разрушения. Испытания на стенде показали работоспособность ввода мощности в ускоряющую структуру.

В настоящее время оттренированный ввод мощности смонтирован на ускоряющей структуре и поворотом петли установлен КСВН = 3.3. При ускорении тока пучка 350 мА до энергии 5 МэВ в ускоряющую структуру через ввод мощности поступает 2.5 МВт. КСВН измеряется направленным ответвителем (переходное ослабление 53 дБ, направленность 30 дБ) в фидерном тракте передачи мощности от генератора к ускоряющей структуре.

### 3.4. Генератор

Возбуждение ускоряющей структуры производится двухкаскадным генератором на мощных импульсных триодах ГИ-50А. Оконечный каскад ВЧ генератора показан на рис. 21 (предварительный каскад аналогичен окончному). Анодно-сеточный контур (1) представляет собой короткозамкнутую коаксиальную линию длиной  $3\lambda/4$  с волновым сопротивлением 28 Ом (диаметр внутренней трубы 220 мм, диаметр наружной трубы – 350 мм). Перестройка анодно-сеточного контура по частоте осуществляется перемещением короткозамыкающего плунжера (4). Во внутреннюю трубу контура вблизи пучности высокочастотного напряжения включены последовательно два разделительных конденсатора типа КВК-5-1500 пФ – 20 кВ (2). Импульс анодного питания к аноду лампы подводится через дополнительный высокочастотный LC-фильтр (5). Сетка лампы заземлена сплошным экраном.

Входное устройство (6) окончного каскада выполнено в виде полуволнового разомкнутого коаксиального согласующего трансформатора, к которому через разделительный конденсатор в нужной для согласования точке подключен фидер от предварительного каскада. Волновое сопротив-

ление фидера 50 Ом ( $\text{Ø}110 \times 48$ ). Диаметр наружной трубы согласующего трансформатора – 170 мм, диаметр внутренней трубы – 140 мм.

Напряжение накала на генераторную лампу (3) подается с помощью четвертьволнового дросселя в виде двухпроводной полосковой линии в точке минимума высокочастотного напряжения катодного контура.

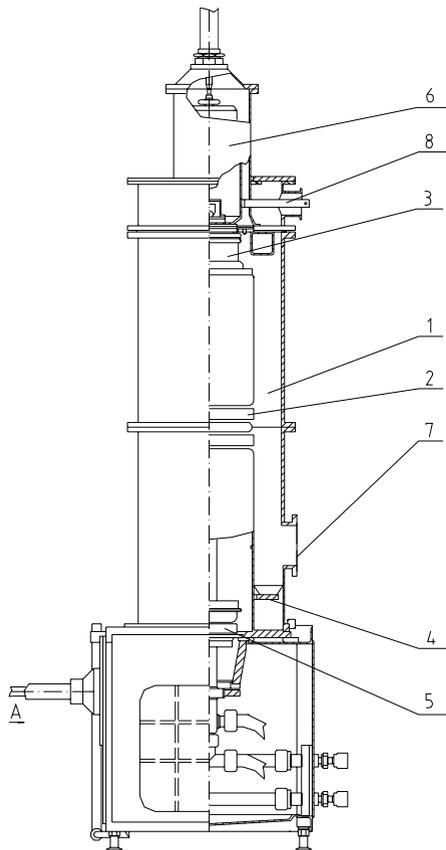


Рис. 21. Оконечный каскад генератора:

1 – анодно-сеточный контур, 2 – анодный разделительный конденсатор, 3 – генераторная лампа ГИ-50А, 4 – закорачивающий плунжер, 5 – анодный LC-фильтр, 6 – катодный контур, 7 – фланец для подключения выходного устройства, 8 – ввод накала генераторной лампы.

Исходными данными для расчета импульсного режима окончного каскада служат паспортные параметры и характеристики генераторной лампы ГИ-50А. Для получения требуемого значения импульсной высокочастотной мощности 2.5 МВт ниже приведен один из возможных

режимов генераторной лампы в критическом режиме: амплитуда импульса анодного напряжения  $U_a = 30$  кВ, максимальная амплитуда импульса анодного тока  $I_{am} = 400$  А при угле отсечки анодного тока  $I_a = 90^\circ$ , постоянная составляющая импульса анодного тока  $I_{a0} = 130$  А, амплитуда первой гармоники импульса анодного тока  $I_{a1} = 200$  А, максимальная амплитуда импульса сеточного тока  $I_{cm} = 100$  А при угле отсечки сеточного тока  $I_c = 80^\circ$ , постоянная составляющая импульсного сеточного тока  $I_{c0} = 20$  А, амплитуда первой гармоники сеточного тока  $I_{c1} = 35$  А, амплитуда напряжения возбуждения  $U_{ck} = 2.6$  кВ, напряжение постоянного смещения между сеткой и катодом  $E_{co} = -500$  В, входное сопротивление каскада  $R_{вх} \approx 10$  Ом, электронный КПД = 74%, сопротивление нагрузки модулятора  $R_0 = 230$  Ом, импульсная мощность, рассеиваемая на сетке  $P_c = 45$  кВт, коэффициент усиления по мощности  $K_m = 10$ .

Расчет высокочастотных полей коаксиального анодно-сеточного контура, проведенный с использованием программы SuperLANS, для указанного выше режима с учетом конфигурации и размеров электродов генераторной лампы, показывает, что высокочастотное напряжение в пучности в области разделительных анодных конденсаторов достигает 40 кВ, а ток в короткозамыкающем плунжере составляет 1.35 кА. При этом, вносимое сопротивление потерь, отнесенное к току в короткозамыкающем плунжере, при КПД контура  $\eta = 0.92$  и мощности в нагрузке  $P_n = 2.5$  МВт должно составлять 3 Ом ( $r_{вн} = 3$  Ом).

Передача мощности в ускоряющую структуру производится по фидеру диаметром 160 мм (50 Ом) и длиной  $2\lambda$ . Связь с анодным контуром оконечного каскада – кондуктивная.

## 4. Запуск прототипа ускорителя

### 4.1. Тренировка и испытания структуры на электрическую прочность

После холодных измерений структура была собрана на вакуум и уложена в горизонтальное, рабочее положение (рис. 22). Далее были подсоединены пять магниторазрядных насосов и произведена откачка на вакуум. После шестичасовой откачки получен вакуум  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр, что является хорошим результатом для системы без предварительного прогрева.

Общий вид ускорителя показан на рис. 23. Слева направо расположены ускоряющая структура с компенсирующими магнитное поле земли катушками Гельмгольца, дуплет квадрупольных линз, система линейной развертки пучка и выпускное окно. Под ускоряющей структурой видны магниторазрядные насосы, а сбоку водяной коллектор.



Рис. 22. Установка ускоряющей структуры на ступень (вид сверху).



Рис. 23. Общий вид прототипа на стенде.

После непродолжительной тренировки был преодолен резонансный высокочастотный разряд (мультипактор). При частоте следования импульсов (1÷25) Гц потребовалось всего 3 часа тренировки. Максимальный уровень ускоряющего напряжения 7.5 МВ также был достигнут в течение нескольких часов.

Экспериментально была проверена эффективность системы охлаждения ускоряющей структуры. В структуру подавалась импульсная мощность, соответствующая средней мощности 10 кВт, что в 10 раз меньше, чем в рабочем режиме. Расход воды, охлаждающей структуру, также был уменьшен в 10 раз, по сравнению с рабочим режимом, и составлял 30 л/мин. Измерялась зависимость от времени перепада температуры воды в системе охлаждения. Установившаяся разность температур составила немногим более 3 °С (рис. 24).

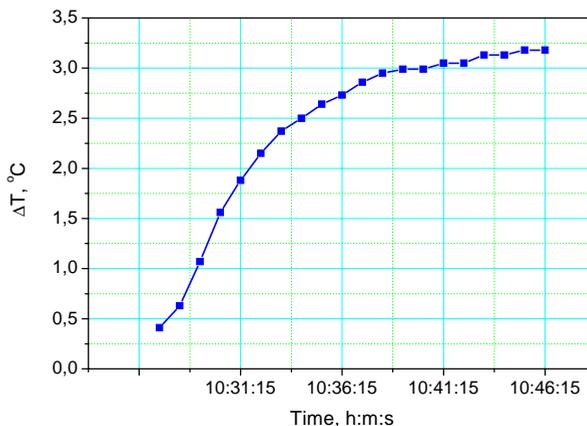


Рис. 24. Измеренная зависимость от времени перепада температуры воды в системе охлаждения.

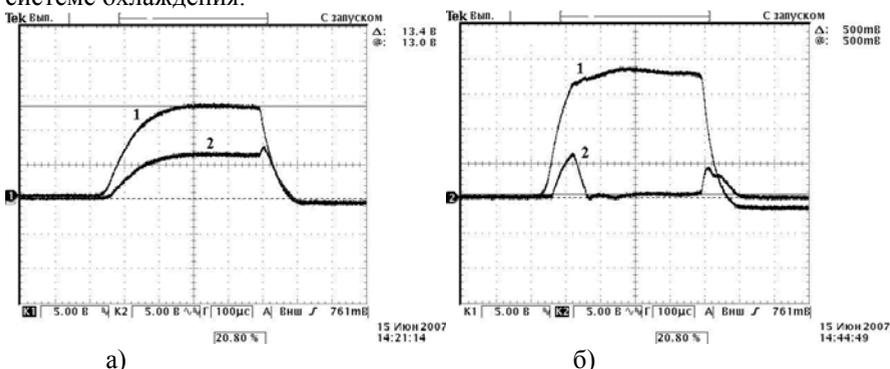


Рис. 25. Результаты измерения амплитуд падающей (кривые 1) и отраженной (кривые 2) волн при отсутствии (а) и при наличии (б) электронного пучка в структуре.

Далее для работы ускорителя с токами  $\sim 300 \div 350$  мА была оптимизирована связь ускорителя с передающим фидером ВЧ генератора путем поворота петли связи. На рис. 25а приведены результаты измерения амплитуд падающей и отраженной волн при отсутствии пучка в структуре. Видно, что амплитуда отраженной волны достигает половины амплитуды падающей волны (рассогласованный режим, коэффициент отражения  $\Gamma=0.5$ ). На рис. 25б приведены результаты измерений при токе пучка с катода 300 мА с подачей ВЧ напряжения на катод пушки. Амплитуда отраженной волны становится близкой к нулю (согласованный режим).

## 4.2. Проведение пучка электронов

Для оптимизации проводки пучка через ускоряющую структуру проводились измерения тока пучка с катода и на выходе из структуры, где на расстоянии 1150 мм от выходного фланца ускорителя был установлен цилиндр Фарадея. Измерения токопрохождения пучка проводились без подачи и с подачей ВЧ напряжения основной гармоники на катод пушки. Заданная величина тока с катода поддерживалась с помощью системы обратной связи.

Первые измерения без ВЧ напряжения на катоде показали токопрохождение ниже 50% и нагрев приосевых элементов ускоряющей структуры. Смещение пучка от оси было вызвано наличием поперечного оси структуры магнитного поля Земли величиной около 1 Гс. Для компенсации этого поля на всей длине структуры было решено установить четыре катушки Гельмгольца длиной около 4.5 м и шириной около 0.8 м (см. рис. 23).

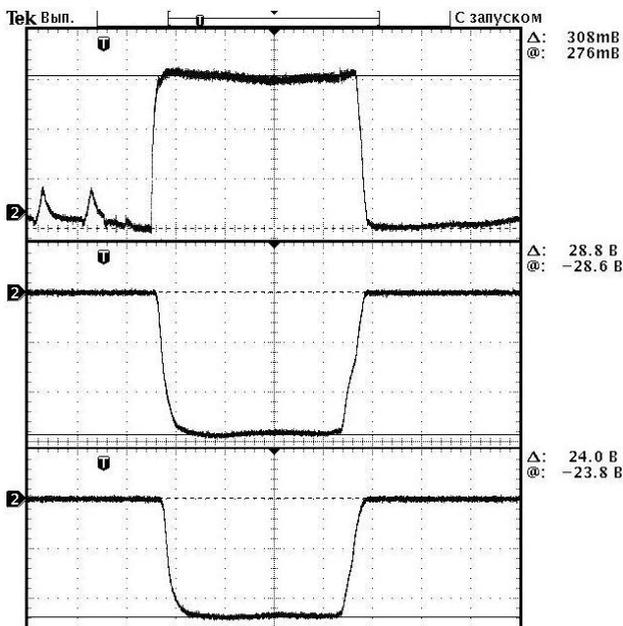


Рис. 26. Осциллограммы тока с катода (вверху) и тока на цилиндр Фарадея при подаче ВЧ напряжения амплитудой 0.7 кВ на катод (в середине) и без подачи (внизу). Ток с катода – 300 мА, ток на цилиндр Фарадея с ВЧ – 288 мА и без ВЧ – 240 мА. Ускоряющее напряжение – 5.18 МВ.

После установки катушек Гельмгольца и подбора в них оптимальных токов полностью был ликвидирован нагрев электродов ускоряемым пучком по всей длине структуры. При этом токопрохождение электронного пучка через структуру без подачи ВЧ напряжения на катод пушки удалось увеличить до 80%, а с подачей до 96%. Это хорошо согласуется с результатами численного моделирования инжекции и динамики пучка в ускорителе. Результаты измерений прохождения тока с катода 300 мА без подачи и с подачей ВЧ напряжения амплитудой 0.7 кВ на катод пушки приведены на рис. 26.

При подаче оптимального по амплитуде и фазе ВЧ напряжения на зазор сетка-катод удалось получить импульсный ток с катода 350 мА при коэффициенте прохождения 96%. Ограничение ускоряемого тока обусловлено предельной импульсной мощностью (~2.5 МВт), используемого в выходном каскаде ВЧ генератора триода ГИ-50А.

Работа ускорителя на максимально возможной частоте повторения импульсов проводилась при подаче ВЧ напряжения на зазор сетка-катод.

Использовалось выпускное устройство с линейной разверткой пучка вдоль окна с выпуском в атмосферу через титановую фольгу. Пучок сбрасывался на алюминиевый коллектор, охлаждаемый водой. Перед магнитом линейной развертки установлен дуплет квадрупольных линз (см. рис. 23) для формирования поперечного размера пучка в пределах  $20 \div 30$  мм на поверхности фольги выпускного окна.

Средняя мощность пучка оценивалась по энергии и среднему току коллектора, а также калориметрическим методом по разности температур и расходу воды. При амплитуде импульса ускоренного тока на коллекторе 300 мА (ток инжекции с катода пушки 317 мА) при длительности импульса 420 мксек и частоте повторения 40 Гц средняя мощность пучка составляет 24 кВт на энергии 5 МэВ. При амплитуде тока 100 мА средняя мощность пучка – 9.6 кВт на энергии 6 МэВ. При амплитуде тока 50 мА средняя мощность пучка – 5.2 кВт на энергии 6.5 МэВ.

### 4.3. Измерение энергетического спектра пучка

Измерение энергии ускоренных электронов производилось с помощью магнитного спектрометра (рис. 27) с неоднородным магнитным полем ( $n = 0.5$ ), углом поворота 148 градусов и радиусом поворота 200 мм. Ток пучка фиксировался на цилиндре Фарадея, установленном после спектрометра. На входе и выходе спектрометра установлены взаимно согласованные коллимирующие щели шириной 2 мм. За энергию ускоренного пучка принималось значение, соответствующее максимуму спектрального распределения.



Рис. 27. Установка спектрометра на выход ускорителя.

На рис. 28 приведены результаты измерения спектров пучка при токе с катода 300 мА без подачи и с подачей на катод дополнительного ВЧ

напряжения амплитудой 0.7 кВ. Видно, что с дополнительным ВЧ напряжением максимум тока на выходе спектрометра увеличивается и смещается в область более высоких энергий. Согласно расчетам – это происходит вследствие инъекции микро импульсов тока пучка в более ранних фазах ускоряющего поля.

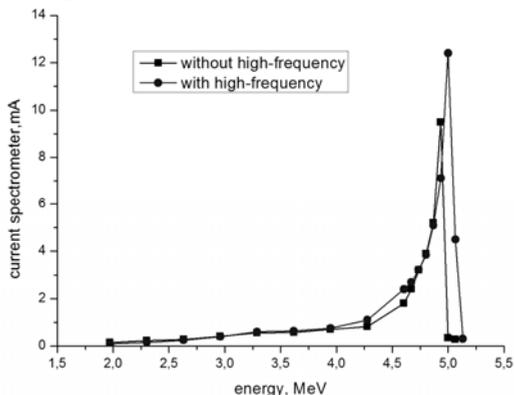


Рис. 28. Зависимость тока на выходе спектрометра от энергии электронов.

#### 4.4. Измерение поперечного размера пучка

Измерение размера пятна пучка на выходе из ускоряющей структуры проводилось методом прожигания отверстия в фольге толщиной 0.25 мм. Фольга устанавливалась перед цилиндром Фарадея на расстоянии 1150 мм от выхода из структуры. Измерения размера пятна пучка проводились в двух режимах – без подачи и с подачей ВЧ напряжения на катод триодной ВЧ пушки. Импульсный ток пучка с катода в обоих режимах устанавливался одинаковым и равным 200 мА. Время экспозиции пучка на фольге подбиралось таким, чтобы достигнуть режима установившегося тока пучка на цилиндре Фарадея и составляло около 2 минут.

На рис. 29 показано сравнение расчетных (картинки сверху) и экспериментальных (фотографии внизу) результатов по измерению поперечных размеров 200 мА пучка при разных режимах проводки пучка: слева – без подачи и справа – с подачей ВЧ напряжения на катод триодной ВЧ пушки. Размер показанных квадратов  $50 \times 50 \text{ мм}^2$ . С учетом хорошо видимого на фотографиях ореола пучка результаты измерений хорошо совпали с расчетами. Как и предсказывалось в расчетах, пучок имеет максимальный размер в направлении, перпендикулярном направлению щелей сетки (рис. 30).

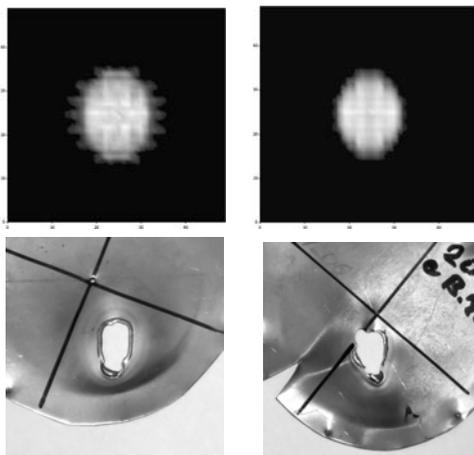


Рис. 29. Расчетные и экспериментальные результаты по измерению поперечных размеров пучка.

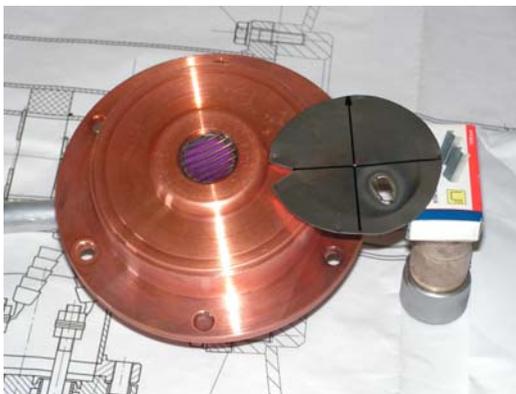


Рис. 30. Фотография катодно-сеточного узла электронной пушки совместно с фольгой.

## 5. Заключение

В ИЯФ СО РАН успешно прошел стендовые испытания в импульсном режиме прототип мощного промышленного ускорителя электронов. В ходе первых экспериментов получены следующие параметры ускорителя:

- Максимальное ускоряющее напряжение 7.5 МВ.
- Импульсный ток пучка 350 мА при энергии электронов 5 МэВ.
- Коэффициент токопрохождения пучка через ускоряющую структуру 96%.

- Импульсная мощность пучка 1.7 МВт.
- Средняя мощность пучка 24 кВт.
- Электронный КПД ускоряющей структуры 68%.

Импульсные параметры ускорителя близки к расчетным, что подтверждает возможность создания мощного промышленного ускорителя. Эффективность системы охлаждения ускоряющей структуры позволяет рассеять в ней мощность, соответствующую режиму ускорителя: энергия электронов 5 МэВ и средняя мощность пучка 300 кВт. Такой режим может быть получен при использовании ВЧ генератора на диакроде ТН628. При добавлении двух ускоряющих ячеек ускоритель сможет работать на энергии до 7.5 МэВ и мощность пучка может достигать более 300 кВт.

## Литература

- [1] *В.Л. Ауслендер и др.* Численные и экспериментальные исследования возможности создания промышленного 300 кВт линейного ускорителя электронов на энергию 5 МэВ. // Препринт ИЯФ 2008-8, 2008.
- [2] *J. Lyles, C. Fredrichs, M. Lynch.* New High Power 200MHz RF System for the LANSCE Drift Tube Linac. // Proc. XIX International Linac Conference, Chicago, 1998, p.231-233.
- [3] *V.L. Auslender et.al.* Industrial High Power Electron Accelerator for the Energy 5-10 MeV. // Problems of Atomic Science and Technology, 2001, v.3, p.18-21.
- [4] *M. Tiunov, V. Auslender, V. Cheskidov, et al.* 5-10 Mev Industrial High Power Electron Accelerator. // Proceedings of EPAC 2002, Paris, France, 2002, p.2813-2815.
- [5] *D. Myakishev, V. Yakovlev.* An Interactive Code SUPERLANS for Evaluation of RF-cavities and Accelerating Structure. // In IEEE Particle Accelerator Conf. Rec., 1991, v.5, p.3002-3004.
- [6] [www.cst.de](http://www.cst.de)
- [7] *М.А. Тиунов, Б.М. Фомель, В.П. Яковлев.* SAM – интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. // Препринт ИЯФ СО АН СССР 89-159, 1989.

*В.Л. Ауслендер, А.А. Брызгин, В.А. Горбунов, И.В. Горнаков,  
Г.И. Кузнецов, А.Н. Лукин, И.Г. Макаров, Н.В. Матяш,  
Г.Н. Острейко, А.Д. Панфилов, Н.Д. Ромашко, Г.В. Сердобинцев,  
В.В. Тарнецкий, М.А. Тиунов, А.А. Тувик, Б.Л. Факторович,  
К.Н. Чернов, В.Г. Ческидов*

**Стендовые испытания прототипа  
мощного промышленного ускорителя электронов  
на энергию 5 МэВ**

*V.L. Auslender, A.A. Bryazgin, V.A. Gorbunov, I.V. Gornakov,  
G.I. Kuznetsov, A.N. Lukin, I.G. Makarov, N.V. Matyash,  
G.N. Ostreiko, A.D. Panfilov, N.D. Romashko, G.V. Serdobintsev,  
V.V. Tarnetsky, M.A. Tiunov, A.A. Tuvik, B.L. Faktorovich,  
K.N. Chernov, V.G. Cheskidov*

**Development tests of high power 5 MeV  
industrial electron accelerator prototype**

ИЯФ 2008-20

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев  
Работа поступила 25.06. 2008 г.

---

Сдано в набор 26.06. 2008 г.

Подписано в печать 27.06. 2008 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 120 экз. Бесплатно. Заказ № 20

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапинтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11